CHAPITRE 2

LES HUILES LUBRIFIANTES

Les huiles lubrifiantes actuellement utilisées sont généralement constituées d'un fluide de base appelé « base de lubrifiant » qui peut être synthétique ou d'origine minérale, auquel sont ajoutés de nombreux additifs dont la nature varie avec la destination du produit.

1 - HUILES DE BASE

Selon l'origine du lubrifiant les bases minérales peuvent être classées en deux grandes catégories [1] :

- Les bases à structures paraffiniques formées d'hydrocarbures saturés à chaîne droite. Ces bases présentent une grande stabilité à l'oxydation et possèdent un indice de viscosité élevé (de l'ordre de 100) ; elles sont par ailleurs peu agressives vis à vis des élastomères habituellement utilisés pour les joints d'étanchéité. Cependant le haut poids moléculaire de certaines chaînes peut entraîner la cristallisation de l'huile dès la température ambiante. Les isoparaffiniques qui possèdent un indice de viscosité moins élevée ne présentent pas cet inconvénient.

- Les bases à structures naphténique, formées de noyaux cycliques. Ces bases sont moins stables à l'oxydation, et présentent un indice de viscosité plus faible (de l'ordre de 50) ; elles sont par ailleurs relativement agressives vis à vis des élastomères. Elles possèdent par contre d'excellentes caractéristiques à basse température.

Ces différentes bases sont généralement obtenues par distillation et raffinage de pétrole brut ; cependant pour des applications plus particulières, les procédés d'hydrocraquage permettent d'obtenir des huiles de base à faible teneur en aromatiques (produits à structure benzénique), à haut indice de viscosité et de très bonne résistance à l'oxydation après additivation.

De nombreux produits synthétiques ont été développés ces 30 dernières années pour résoudre des problèmes de lubrification particulièrement difficiles. On peut citer comme exemple les fluides de haute stabilité thermique, les fluides difficilement inflammables et les lubrifiants pour l'aviation.

Parmi les principales familles de produits utilisés on mentionnera :

- Les esters aliphatiques qui se caractérisent par un indice de viscosité élevé, une faible volatilité et des propriétés lubrifiantes excellentes,

- les esters phosphoriques utilisés souvent comme additifs anti-usure, qui présentent un indice de viscosité élevé et sont difficilement inflammables,

- les silicones et silicates qui ont un excellent indice de viscosité et un point d'écoulement très bas ; cependant leurs propriétés lubrifiantes ne sont pas très bonnes,

- les polyphényléthers qui présentent une remarquable stabilité à haute température (jusqu'à 450° C environ) et qui sont d'excellents lubrifiants. Ils ont cependant un indice de viscosité faible et sont très onéreux,

- les polypropylènes glycols qui se caractérisent par un indice de viscosité élevé, un point d'écoulement très bas et de bonnes propriétés anti-usure, cependant ils ont une stabilité thermique et une résistance à l'oxydation assez moyenne et certains ne sont pas miscibles aux bases minérales,

- les polyoléfines qui présentent un indice de viscosité assez élevé et un point d'écoulement très bas.

Tous ces produits sont utilisés soit purs soit en mélange avec d'autres bases synthétiques ou minérales.

2 - ADDITIFS OU DOPES

Les propriétés des bases utilisées sont généralement modifiées par des composés de structures chimiques très variées, appelés additifs ou dopes que nous allons examiner succinctement [1, 2].

2.1 - ADDITIFS "AMÉLIORANT D'INDICE DE VISCOSITÉ"

Ce sont des polymères qui introduits à faible concentration dans une base lubrifiante entraînent une augmentation relative de la viscosité plus importante à haute qu'à basse température et qui par conséquent augmentent l'indice de viscosité du lubrifiant sans modifier défavorablement les autres propriétés essentielles.

Les produits généralement utilisés sont des polyméthacrylates, des polyacrylates et des polymères d'oléfine.

Il faut cependant mentionner que ces polymères, utilisés comme additifs, ont des masses moléculaires élevées et sont relativement « fragiles ». Ils peuvent se dégrader d'une part sous l'effet de sollicitations mécaniques telles que les contraintes de cisaillement, par rupture de la molécule et d'autre part sous l'effet de la température soit par thermo-oxydation soit par dépolymérisation.

Par ailleurs, le comportement de ces solutions de polymères n'est pas exactement newtonien. En effet, lorsque le lubrifiant est soumis à des contraintes de cisaillement très élevées, on observe au-delà d'un certain seuil une chute de viscosité réversible qui correspondrait à un allongement des molécules dans la direction de l'écoulement. Lorsque la contrainte de cisaillement augmente, la viscosité effective de la solution tend asymptotiquement par valeur supérieure vers celle de l'huile de base.

2.2 - ADDITIFS DE POINT D'ÉCOULEMENT

A basse température la cristallisation des paraffines modifie les propriétés rhéologiques du lubrifiant qui tend à se solidifier. Les additifs de point d'écoulement sont donc utilisés pour lutter contre cette solidification. Ils agissent sans doute par absorption en diminuant la taille des cristaux de paraffine, ou en modifiant la forme cristalline qui évolue vers une structure en aiguilles et en réduisant l'adhésion entre les cristaux.

Les produits utilisés appartiennent aux quatre familles suivantes : les alkyl-aromatiques, les polyesters, les polyamides et les polyoléfines.

2.3 - ADDITIFS DÉTERGENTS ET DISPERSANTS

Ces additifs permettent d'une part de maintenir les parties les plus chaudes d'un moteur en bon état de propreté en évitant les dépôts, c'est l'effet détergent et d'autre part, de maintenir en suspension les impuretés solides formées au cours du fonctionnement du moteur afin d'éviter la formation d'agglomérats, c'est l'effet dispersant. Par ailleurs ces additifs généralement basiques neutralisent les composés acides formés par la combustion.

L'action de ces additifs s'effectue essentiellement par absorption sur les surfaces métalliques afin d'éviter l'adhérence des dépôts et par absorption sur les particules en suspension dans l'huile pour maintenir leur dispersion.

Les produits utilisés sont soit des organo-sels de métaux alcalino-terreux tels que les sulfonates, les thiophosphates et les phénates, soit des succinimides plutôt utilisées comme dispersants.

2.4 - ADDITIFS ANTI-USURE ET EXTRÊME PRESSION

Les additifs anti-usure et extrême pression agissent de façon sensiblement identique : un film protecteur se forme sur les surfaces du contact par réaction de l'additif ou de ses produits de décomposition, avec le métal. La distinction entre ces additifs est basée essentiellement sur la température à laquelle ils réagissent, température qui dépend directement des conditions de charge et de vitesse au contact. Les additifs anti-usure agissent dès la température ambiante ou à moyenne température alors que les additifs extrême pression sont actifs à température élevée.

Les additifs anti-usure sont essentiellement des esters phosphoriques et des dithiophosphates. Les mécanismes d'action de ces différents produits ont fait l'objet de nombreuses études mais n'ont pas encore été totalement élucidés. L'activité des esters phosphoriques semble directement liée au degré d'acidité des acides correspondants ; par contre ce sont les produits de décomposition thermique des dithiophosphates qui réagissent à la surface du métal, le phosphore joue alors un rôle essentiel dans la protection anti-usure.

Les additifs extrême pression sont des composés soufrés, chlorés et des dérivés phosphore-soufre :

- Les produits soufrés tels que les esters gras soufrés à forte concentration de soufre réagissent à haute température pour former une couche protectrice de sulfure de fer. Les sulfures organiques agiraient de la façon suivante : les disulfures initialement absorbés sur les surfaces

métalliques se transforment en monosulfures organiques qui présentent des propriétés anti-usure. Ces sulfures organiques, sous l'effet des pressions, des contraintes de cisaillement et des températures, sont détruits ; les sulfures inorganiques alors formés réagissent avec le métal et présentent des propriétés extrême pression.

- Les composés chlorés sont principalement des esters gras chlorés, des paraffines chlorées et des acides gras chlorés. Ces produits se décomposent à haute température en libérant du chlore très actif qui réagit avec les surfaces métalliques pour former probablement des chlorures de fer. Ces produits peuvent dans certains cas être très corrosifs et sont de ce fait plutôt utilisés pour les huiles d'usinage.

- Les dérivés phosphore-soufre sont des produits mis au point plus récemment, dont la composition et les mécanismes d'action sont encore peu connus. Ces composés ont d'excellentes propriétés extrême pression, ils sont encore stables à des températures de l'ordre de 120° C et sont peu réactifs vis à vis des métaux cuivreux. Pour ces différentes raisons ils sont très largement utilisés dans les huiles industrielles.

2.5 - ADDITIFS ANTI-OXYDANTS

Ces produits ont pour rôle de ralentir et si possible de supprimer les phénomènes d'oxydation du lubrifiant. Ils agissent de trois façons différentes :

- par blocage du processus de destruction en captant les radicaux libres des chaînes moléculaires. Ces produits sont généralement des phénols et des amines;

- par destruction des peroxydes qui se forment lors des phénomènes de détérioration. Ces composés sont des dithiophosphates et des dithiocarbamates;

- par désactivation des ions métalliques et par formation d'un film protecteur sur les surfaces afin d'éliminer l'action catalytique des métaux. Ces additifs sont des phénols et des phénates.

2.6 - ADDITIFS DIVERS

D'autres produits sont encore utilisés comme additifs ; on peut citer :

- Les additifs d'onctuosité qui agissent par absorption sur les surfaces du contact et qui sont destinés à diminuer les frottements dans le cas de contact métal sur métal. Ce sont des esters gras, alcools gras, amines grasses et acides gras.

- Les additifs antirouille qui agissent par absorption sur le métal et formation d'une couche protectrice quasi-imperméable à l'air, à l'eau et aux composés corrosifs. Ces produits qui sont des sulfonates, naphténates, des sels d'amines et des acides gras, sont parfois incompatibles avec les additifs anti-usure.

- Les additifs anti-émulsionnants dont le rôle est d'éviter la formation de mousse.

3 - VISCOSITE DES LUBRIFIANTS

De toutes les propriétés physiques et chimiques à considérer en lubrification, la viscosité est l'une des plus importante. Dans les paliers, les engrenages et les systèmes

hydrauliques où le régime de fonctionnement est hydrodynamique, c'est la viscosité qui détermine les pertes par frottement, la capacité de charge et l'épaisseur du film d'huile.
La viscosité est véritablement une mesure de l'aptitude physique d'un fluide à assurer la lubrification par film complet sous des conditions définies de vitesse, de charge et de température.

3.1 - DÉFINITION DE LA VISCOSITÉ

Selon la norme N.F. T 60-100 de Novembre 1959 : « La viscosité d'un liquide est la propriété de ce liquide, résultant de la résistance qu'opposent ses molécules à une force tendant à les déplacer par glissement dans son sein ».

Ainsi la viscosité d'un fluide est la résistance opposée par ce fluide à tout glissement interne de ses molécules les unes sur les autres.

Cette force de résistance peut être calculée par la formule de Newton relative à l'écoulement laminaire d'un fluide entre une surface mobile animée d'une vitesse V et une surface fixe (fig. 1). Entre ces deux surfaces les différentes « pellicules » de fluide vont également se déplacer à des vitesses v différentes variant de 0 à V.

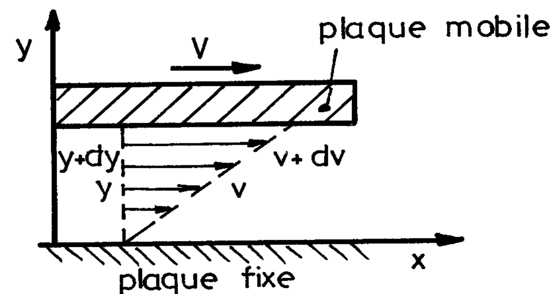


Fig. 1 : Ecoulement de Couette

Si à une distance y de la surface fixe, la vitesse de la pellicule de fluide est v et devient v+dv à la distance y+dy alors la contrainte tangentielle σ_{xy} appelée fréquemment contrainte de cisaillement, et notée τ, est donnée par :

$$\tau = \sigma_{xy} = \mu \frac{dv}{dy}$$

où μ est un coefficient caractéristique du fluide appelé viscosité dynamique.

L'hypothèse selon laquelle il existe un coefficient de proportionnalité, appelé viscosité dynamique, entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse est justifié par l'expérience pour un grand nombre de fluides, dits fluides newtoniens. Parmi ceux-ci, on trouve l'eau et de nombreuses huiles lubrifiantes. La présence de macromolécules, ou des conditions sévères d'utilisation, font que la relation de proportionnalité n'existe pas toujours : le fluide est alors non newtonien. Cet aspect sera abordé succinctement dans la dernière partie de ce chapitre.

Dans le cas général, pour un fluide newtonien, la relation qui lie le tenseur des contraintes σ_{ij} au tenseur des taux de déformation ε_{ij} s'écrit :

$$\sigma_{ij} = (-p + \lambda\theta)\delta_{ij} + 2\mu\,\varepsilon_{ij} \qquad \text{avec} \qquad \theta = \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

Dans cette relation, p est la pression, θ le taux de dilatation cubique, δ_{ij} le symbole de Kronecker et μ et λ deux coefficients de viscosité. Pour un fluide incompressible $\theta = 0$: le second coefficient de viscosité λ n'intervient plus.

3.2 - UNITÉS DE VISCOSITÉ

De la relation ci-dessous, on tire immédiatement l'équation dimensionnelle de la viscosité dynamique μ :

$$\mu = M\ L^{-1}\ T^{-1}$$

En mécanique des fluides, s'introduit fréquemment dans les calculs la quantité $\nu = \mu/\rho$, rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide. Cette viscosité ν s'appelle la viscosité cinématique. Ses dimensions sont :

$$\nu = L^2\ T^{-1}$$

L'unité de viscosité dynamique, dans le système normalisé (S.I.) est le Pascal seconde (Pa.s.) identique au Poiseuille ($P\ell$) anciennement utilisé dans le système M.K.S.A.. C'est le coefficient de proportionnalité d'un fluide dans lequel la contrainte de cisaillement est 1 N/m^2 pour un gradient de vitesse de 1 s^{-1}. Dans le système C.G.S., l'unité de viscosité dynamique est le Poise (Po). Ces unités étant généralement trop grandes pour les huiles couramment employées, on utilise souvent le milliPascal seconde (mPa.s) et le centipoise (cPo) qui correspondent sensiblement à la viscosité de l'eau à 20° C.

Dans le système C.G.S. l'unité de viscosité cinématique est le Stokes (St). Dans la pratique on utilise le centistokes (cSt). Il n'existe pas de nom à l'unité de viscosité cinématique dans le système S.I. c'est donc le m^2/s. Le tableau 1 résume les données relatives aux unités de viscosité.

Tableau 1 : Unités de viscosité

Viscosité	Dimension	C.G.S.	S.I.	Correspondance
μ (dynamique)	$M\ L^{-1}\ T^{-1}$	Poise (Po) g/cm.s	Pascal seconde (Pa.s) Kg/m.s	1 cPo 1 mPa.s
ν (cinématique)	$L^2\ T^{-1}$	Stokes (St) cm^2/s	m^2/s	1 cSt 1 mm^2/s

Dans le tableau 2 nous présentons à titre d'exemple la viscosité dynamique de quelques fluides ; sauf indication contraire, cette viscosité est donnée pour une température de 20° C.

4 - VISCOSIMETRIE

Pour mesurer la viscosité d'un liquide, on emploie des viscosimètres qui se rangent en deux catégories, les viscosimètres absolus et les viscosimètres empiriques.

Tableau 2 : Ordre de grandeur de la viscosité dynamique de quelques fluides.

Fluide	Pascal seconde (Pa.s)
Air	$1{,}8\ 10^{-5}$
Ether	$2{,}4\ 10^{-4}$
Benzène	$6{,}4\ 10^{-4}$
Eau	10^{-3}
Mercure	$1{,}5\ 10^{-3}$
Huiles minérales	10^{-2} à 1,5
Huile de ricin	0,725
Glycérine à 97%	0,805
Sodium à 400° C	$2{,}8\ 10^{-4}$
Zinc à 500° C	$2{,}8\ 10^{-3}$
Plomb à 500° C	$1{,}85\ 10^{-3}$

4.1 - Les viscosimètres absolus

Il existe plusieurs types de viscosimètres :

4.1.a - Les viscosimètres à capillaire

Ce sont des tubes capillaires calibrés dans lesquels on fait couler le fluide sous une différence de pression constante à une température uniforme et fixe. Le débit du fluide varie alors proportionnellement à la différence de pression par unité de longueur de tube, à la puissance quatrième du diamètre et en raison inverse de la viscosité absolue dynamique.

La loi d'écoulement dans les capillaires a été déterminée par Poiseuille en 1840. Elle est connue généralement sous le nom de loi de Hagen-Poiseuille car Hagen a proposé la même relation quelques années plus tard ; elle s'exprime par la relation :

$$Q = \frac{\pi\, r^4 \Delta p}{8 \mu \ell}$$

où Q est le débit, r et ℓ respectivement le rayon et la longueur du tube, μ la viscosité dynamique et Δp la différence de pression existant entre les deux extrémités du tube. Cette relation est valable pour un fluide incompressible en écoulement laminaire et permanent et pour des tubes dont le rapport de la longueur au diamètre est supérieur à 100. De plus cette relation ne tient pas compte des effets d'inertie dans le fluide.

Dans certains types de viscosimètres à capillaire, l'écoulement s'effectue à pression constante sous la seule action du poids du liquide dans ce cas :

$$\Delta p = \rho g h$$

où ρ est la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur et h la distance verticale entre les deux niveaux du fluide. Dans ce cas, la viscosité cinématique peut être déduite à partir du temps t mis par un volume V de fluide à s'écouler au travers du tube capillaire par la relation :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi\, r^4 g\, t}{8V} = K\, t$$

Ces viscosimètres dont l'un porte le nom de viscosimètre Ubbelohde sont très précis ; on peut mesurer des viscosités avec une précision meilleure que 0,3%.

4.1.b - Les viscosimètres de Couette

Dans ces viscosimètres, on mesure le couple résistant transmis par le fluide contenu entre deux cylindres coaxiaux dont l'un est en rotation.

Couette, en 1890, a présenté une étude de ce type d'écoulement et a montré que le couple $\mathcal{C}$ mesuré en régime laminaire était lié à la viscosité dynamique μ par la relation :

$$\mathcal{C} = \frac{4\pi\mu R_1^2 R_2^2\, L\,(\omega_1 - \omega_2)}{R_2^2 - R_1^2} \quad \text{soit} \quad \mu = \frac{K}{\omega_1 - \omega_2}$$

Dans cette relation ω_1, R_1 et ω_2, R_2 sont respectivement les vitesses angulaires et les rayons des cylindres intérieur et extérieur et L la longueur du cylindre intérieur. Dans le cas où la différence des rayons est très faible devant les rayons et lorsque seul le cylindre intérieur est en rotation, on peut écrire :

$$R_1 \approx R_2 \approx R \;\text{ et }\; C = R_2 - R_1$$

d'où

$$\mathcal{C} = \frac{2\pi\mu\, R^3 L\omega}{C}$$

Ces viscosimètres sont précis et permettent, pour des jeux relatifs C/R petits, de mesurer des viscosités à des taux de cisaillement constants relativement élevés. En effet, dans ce cas, le taux de cisaillement :

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{\omega R}{C}$$

peut atteindre $10^6\ s^{-1}$; cependant ceci suppose des vitesses angulaires élevées et des jeux très petits et donc une énergie importante dissipée dans le fluide qu'il est difficile d'évacuer.

4.1.c Les viscosimètres à disques ou à cônes

Dans ces viscosimètres, on mesure comme précédemment le couple transmis par le fluide entre un disque ou un cône en rotation à vitesse constante et un plan fixe.

Dans le cas d'un disque, le couple est lié à la viscosité μ par la relation :

$$C = \frac{\pi \mu R^4 \omega}{2h}$$

où ω est la vitesse angulaire, R le rayon du disque et h la distance entre le disque et le plan. Dans le cas d'un cône, cette relation s'écrit :

$$C = 2\pi \mu \omega \left[\frac{R^3}{3 \cot g \alpha} - \frac{R^2 h_0}{2 \cot g^2 \alpha} + \frac{R h_0^2}{\cot g^3 \alpha} - \frac{h_0^3}{\cot g^4 \alpha} \ell n(1 + \frac{R}{h_0} \cot g \alpha) \right]$$

Dans cette relation, h_0 est la hauteur entre l'extrémité du cône et le plan et α le demi angle au sommet du cône. Remarquons qu'avec ces types de viscosimètres, les hauteurs h et h_0 peuvent varier d'une mesure à l'autre, ce qui diminue la précision des mesures.

Dans certains viscosimètres à disque tel le viscosimètre Brookfield utilisé pour les fluides très visqueux ou pour les mesures à basse température, on détermine la viscosité par la mesure du couple nécessaire pour entraîner en rotation à vitesse constante un disque épais à l'intérieur d'un godet rempli de fluide.

4.1.d - Les viscosimètres à chute de billes

Lorsqu'une bille est en chute libre dans un liquide elle atteint une vitesse limite V dont la valeur dépend de la viscosité du fluide. Cette vitesse est donnée par la relation :

$$V = \frac{2r^2 g}{9\mu}(\rho_b - \rho_\ell)$$

où r est le rayon de la bille, g l'accélération de la pesanteur et ρ_b et ρ_ℓ sont respectivement les masses volumiques de la bille et du liquide. La mesure de la vitesse s'effectue par la mesure du temps mis par la bille pour passer entre deux repères.

Un autre type de viscosimètre à chute de bille quelquefois utilisé est formé d'une bille qui roule sous l'effet de son propre poids à l'intérieur d'un tube incliné d'un angle donné. Le diamètre de la bille étant légèrement inférieur au diamètre intérieur du tube, une grande précision est requise.

Ces viscosimètres sont généralement utilisés pour déterminer la viscosité des liquides de grande viscosité ou soumis à des pressions très élevées.

4.1.e - Les viscosimètres absolus étalonnés

Dans tous les viscosimètres ci-dessus, la viscosité du fluide est donnée par une relation dont les coefficients dépendent de paramètres géométriques qu'il n'est pas toujours commode de connaître avec une très grande précision. Pour cette raison, on effectue en laboratoire l'étalonnage du viscosimètre à partir du fluide dont la viscosité est connue ce qui permet ensuite de mesurer des viscosités avec une précision qui peut atteindre 1°/₀₀

4.2 - LES VISCOSIMÈTRES EMPIRIQUES

Dans ces appareils, dont les plus courants sont les viscosimètres Saybolt (Etats-Unis), Redwood (Angleterre) et Engler (Europe continentale), on mesure le temps d'écoulement d'un volume donné de fluide à travers un ajutage. Les mesures sont généralement faites pour des températures fixées à l'avance et à chaque type de viscosimètre correspond une unité de viscosité qui lui est propre. Comme le régime d'écoulement au travers l'ajutage n'est pas permanent la relation qui permet de déterminer la viscosité cinématique dans un système d'unités cohérent est une loi empirique qui, pour les viscosimètres Saybolt et Redwood, dépend de la température à laquelle les mesures sont effectuées. Par contre il existe pour le viscosimètre Engler une relation, dite de Ubbelodhe, valable quelle que soit la température :

$$\nu = 7{,}55\ E - 3{,}6 / E$$

où ν est la viscosité cinématique exprimée en centistokes et E la viscosité exprimée en degrés Engler ($E > 3$).

Le tableau 3 résume l'essentiel concernant les viscosimètres empiriques en usage dans la pratique courante et le tableau 4 donne une correspondance entre les différentes unités de viscosité cinématique empirique [3].

Tableau 3 : Viscosimètres empiriques

Nom du viscosimètre	Quantité d'huile	Expression des résultats	Températures de référence	Unité de viscosité
ENGLER (Europe continentale)	200 cm^3	Temps d'écoulement de l'huile divisé par celui de la même quantité d'eau à 20°C	20°C 50°C 100°C 150°C	Degré Engler
SAYBOLT (Etats-Unis)	60 cm^3	Temps d'écoulement en secondes	70°F 100°F 130°F 210°F	Seconde Saybolt Universelle S.U.S.
REDWOOD (Angleterre)	50 cm^3	Temps d'écoulement en secondes	70°F 100°F 140°F 200°F	Seconde Redwood

Tableau 4 : Correspondance des viscosités

Viscosité Cinématique centiStokes	Degrés Engler	Secondes Saybolt SUS		Seconde Redwood R		
	Toutes températures	100 F (37,8° C)	210 F (98,9° C)	70 F (21,1° C)	140 F (60° C)	210 F (93,3° C)
2	1,14	32,6	32,8	30,2	30,95	31,20
2,5	1,18	34,4	34,6	31,4	32,2	32,45
3	1,23	36,0	36,2	32,7	33,45	33,70
3,5	1,27	37,6	37,8	34	34,7	35
4	1,31	39,2	39,5	35	36	36
4,5	1,35	40,8	41,1	37	37	38
5	1,40	42,4	42,7	38	39	39
5,5	1,44	44	44,3	39	40	40
6	1,48	45,6	45,9	41	41	42
6,5	1,52	47,2	47,5	42	43	43
7	1,57	48,8	49,1	43	44	44
7,5	1,61	50,4	50,8	45	45	46
8	1,65	52,1	52,4	46	46	47
8,5	1,70	53,7	54,1	48	48	48
9	1,75	55,4	55,8	49	49	50
9,5	1,79	57,1	57,5	50	51	51
10	1,84	58,8	59,2	52	52	53
11	1,92	62,4	62,8	55	55	56
12	2,02	66	66,4	48	58	59
13	2,12	69,7	70,2	61	62	62
14	2,22	73,5	74	65	65	65
15	2,32	77,4	79,9	68	68	69
16	2,43	81,4	81,9	71	72	72
17	2,54	85,4	86	75	75	76
18	2,65	89,5	90,1	78	79	80
19	2,76	93,6	94,3	82	82	83
20	2,87	97,8	98,5	85	86	87
21	2,99	102,1	102,7	89	90	91
22	3,11	106,3	107	93	94	95
23	3,22	110,6	111,4	96	97	99
24	3,35	115	115,8	100	101	103
25	3,46	119,4	120,2	104	105	106
26	3,59	123,7	124,6	108	109	110
27	3,70	128,2	129	112	113	114
28	3,83	132,6	133,8	116	117	118
29	3,95	137,0	138,0	120	121	122

Tableau 4 (suite)

Viscosité Cinématique centiStokes	Degrés Engler	Secondes Saybolt SUS		Seconde Redwood R		
	Toutes températures	100 F (37,8° C)	210 F (98,9° C)	70 F (21,1° C)	140 F (60° C)	210 F (93,3° C)
30	4,08	141,5	142,5	123	125	126
31	4,20	146	147	127	129	131
32	4,32	150,5	151,5	131	133	135
33	4,45	155	156	135	137	139
30	4,08	141,5	142,5	123	125	126
31	4,20	146	147	127	129	131
32	4,32	150,5	151,5	131	133	135
33	4,45	155	156	135	137	139
34	4,58	159,5	160,6	139	141	143
35	4,71	164	165,1	143	145	147
36	4,82	168,6	169,7	147	149	151
37	4,95	173,1	174,3	151	153	155
38	5,08	177,6	178,8	155	157	159
39	5,21	182,2	183,4	159	161	163
40	5,35	186,8	188	164	165	167
41	5,46	191,3	192,6	168	169	171
42	5,59	195,9	197,2	172	173	176
43	5,72	200	201	176	177	180
44	5,85	205	206	180	181	184
45	6	210	211	184	185	188
46	6,11	214	215	188	189	192
47	6,24	219	220	192	193	196
48	6,37	223	224	196	197	201
49	6,50	228	229	200	201	205
50	6,65	233	234	204	205	209
55	7,30	256	257	224	226	230
60	7,95	279	280	244	246	251
65	8,54	302	303	264	266	272
70	9,21	325	326	285	287	293
75	9,87	348	350	305	307	313
80	10,5	371	373	325	328	334
85	11,2	394	396	345	348	355
90	11,8	417	419	366	369	376
95	12,5	440	443	386	389	397
100	13,2	463	463	406	410	418

5 - VARIATION DE LA VISCOSITE AVEC LA TEMPERATURE

5.1 - LOIS DE LA VARIATION

En général les fluides ont une viscosité qui dépend très largement de la température. Cette variation qui au voisinage de 20° C est de 2,5% par degré pour l'eau peut atteindre 10 à 15% par degré pour les huiles minérales. La viscosité est une fonction décroissante de la température, elle chute très rapidement aux basses températures puis plus lentement aux températures élevées (fig. 2)

Pour une huile lubrifiante, on peut poser [4] :

$$\mu = \mu_0 e^{-\left(\frac{E}{T}\right)}$$

avec

$$E = a + bT + cT^{\pm 2}$$

où μ_0 est la viscosité dynamique à une température donnée, T la température absolue et où a, b, c sont à déterminer pour chaque lubrifiant.

On peut aussi utiliser la relation de Mac Coull et Walther [5] :

$$\mathrm{Log}_{10}\,\mathrm{Log}_{10}\,(\nu + a) = -\,m\,\mathrm{Log}_{10}\,T + n$$

où ν est la viscosité cinématique, a, m et n des constantes qui dépendent du lubrifiant, et T la température absolue. La valeur de a dépend de l'unité de viscosité ; si ν est en centistokes a est compris entre 0,6 et 0,75.

La relation ci-dessus montre que si l'on porte en abscisse le logarithme de la température et en ordonnée le Log Log ν, la courbe de variation de la viscosité avec la température devient une droite. C'est ce graphique, dû à Mac Coull, qui a été normalisé par l'ASTM (American Society for Testing Materials). Un tel abaque permet pour une huile donnée de déterminer sa viscosité à une température donnée si on la connaît pour 2 autres températures.

D'autres relations ont aussi été proposées, on peut citer :

- la relation de Barr

$$\left[\mathrm{Log}_{10}\,(\nu + 0{,}8)\right]^{0,3} = A + \frac{B}{T}$$

- la relation de Hugel et Clairbois

$$\mathrm{Log}_{10}\,(\mu + a)\,(T + b) = c$$

où ν et μ sont respectivement les viscosités cinématique et dynamique de l'huile, T la température absolue et a, b, A, B et c des constantes caractéristiques du lubrifiant.

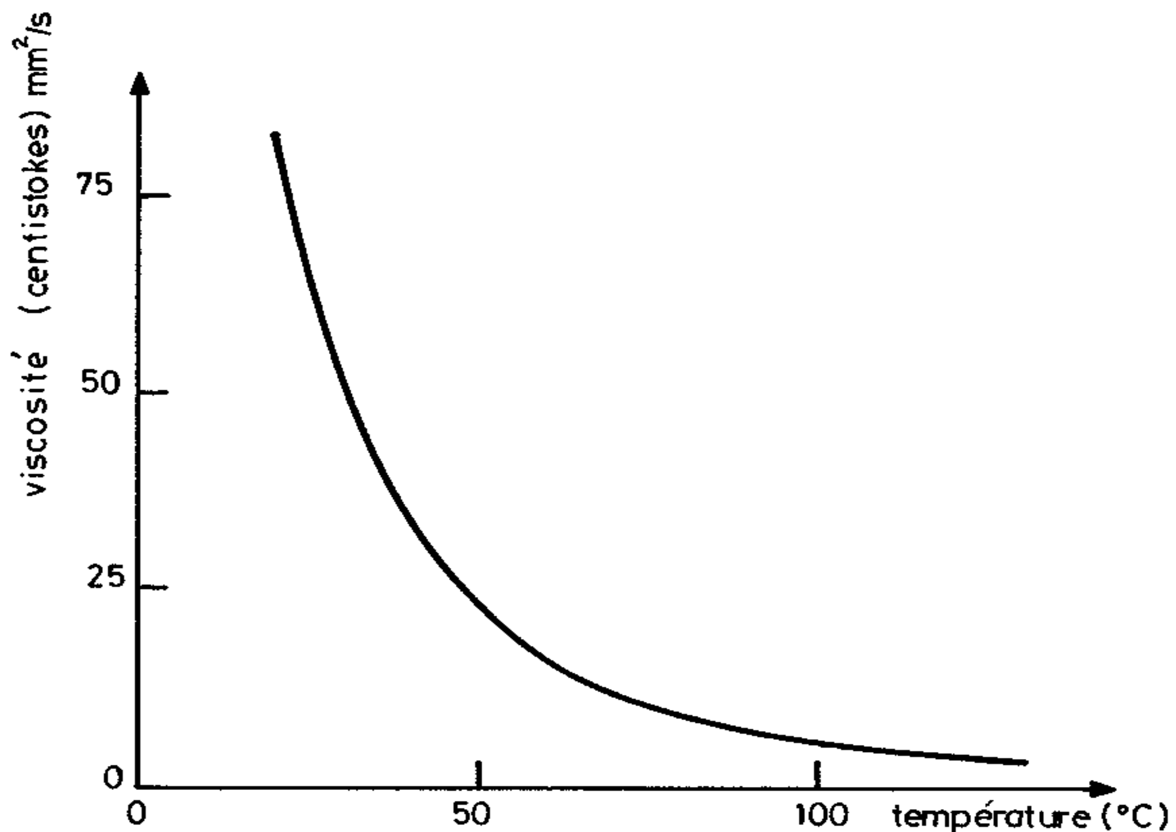


Fig. 2 : Variation de la viscosité avec la température pour une huile minérale paraffinique (huile Total Preslia 32)

5.2 - INDICE DE VISCOSITÉ

Des divers indices de viscosité qui ont été proposés jusqu'à ce jour seul celui de Dan et Davis est d'usage universel, bien qu'il fasse encore l'objet de critiques justifiées.

En 1929, ces auteurs ont classé toutes les huiles connues en différentes catégories selon la valeur de leur viscosité cinématique (SSU) à 210° F (98° C). Parmi toutes les huiles de même viscosité à 210 F, ils ont retenu les 2 huiles ayant à 100° F (37,8° C) d'une part, la plus faible viscosité et d'autre part, la plus grande viscosité. La première correspond à une huile à caractère paraffinique, dont la viscosité varie relativement peu avec la température. La seconde à une huile à caractère naphténique, dont la viscosité varie beaucoup avec la température. Ils ont alors donné arbitrairement l'indice 100 à la première et 0 à la seconde. En Europe et depuis 1975 aux Etats Unis, les températures de références sont de 40° et 100° C.

Pour déterminer l'indice de viscosité d'une huile de viscosité U à 40° C et P à 100° C, on recherche les viscosités respectives L et H à 40° C des huiles de références à caractères paraffinique et naphténique ayant la viscosité P à 100° C (Fig. 3). L'indice de viscosité VI (Viscosity Index) est alors donné par :

$$VI = 100 \frac{L - U}{L - H}$$

Les viscosités des huiles de référence sont données dans les tables de la Norme NF T 60-136 "Calcul de l'indice de viscosité à partir de la viscosité cinématique".

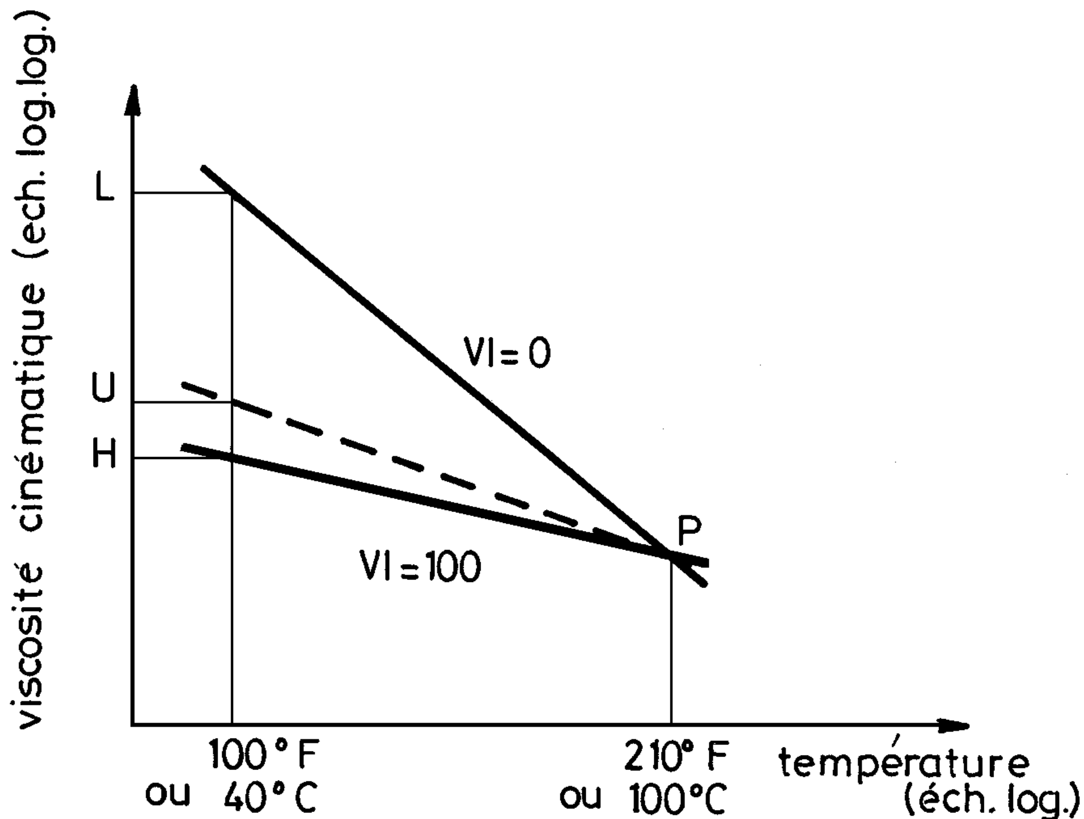


Fig. 3 : Définition de l'indice de viscosité

Exemple : Les viscosités cinématiques mesurées à 40° C et 100° C pour un produit pétrolier dont l'indice de viscosité est à calculer, sont respectivement U = 73,30 mm^2/s et P = 8,86 mm^2/s. Dans les tables L = 119,94 mm^2/s et H = 69,48 mm^2/s, soit :

$$VI = 100\frac{119{,}94 - 73{,}30}{119{,}94 - 69{,}48}$$

en arrondissant au nombre entier le plus proche :

$$VI = 92$$

Depuis la définition de cet indice, de nombreuses huiles ont été formulées et il existe maintenant des lubrifiants dont l'indice de viscosité est très supérieur à 100, ce qui correspond à des huiles dont la viscosité dépend relativement peu de la température. Pour ce type d'huile, une autre définition de l'indice de viscosité a été proposée par l'ASTM. Cet indice appelé VI_E.

$$VI_E = \frac{10^N - 1}{0{,}00715} + 100$$

avec

$$N = \frac{\log_{10} H - \log_{10} U}{\log_{10}(\nu \text{ à } 100°C)}$$

Cette relation qui permet de mieux prendre en compte la variation de la viscosité avec la température pour les huiles à haut indice de viscosité, n'est utilisée que lorsque l'indice de viscosité VI est supérieur à 100.

6 - VARIATION DE LA VISCOSITE AVEC LA PRESSION

La plupart des huiles lubrifiantes ont une viscosité qui croît avec la pression. Ce phénomène présente une importance pratique car dans certains mécanismes le lubrifiant subit des pressions qui peuvent atteindre 10^9 Pa, c'est le cas en particulier dans les roulements et les engrenages.

Le tableau 5 donne la variation de viscosité avec la pression d'une huile à caractère paraffinique.

Tableau 5 : Variation de la viscosité avec la pression pour une huile paraffinique

Pression en MPa	0,1	10	20	30	40	50	100
Viscosité en Pa.s	0,05	0,06	0,075	0,11	0,15	0,23	0,70

On remarque que la viscosité augmente d'autant plus vite que la pression est plus importante. Cette augmentation dépend de la nature du lubrifiant, elle est plus importante pour les huiles à caractère naphténique que pour les huiles à caractère paraffinique. Le tableau 6 donne à titre d'exemple les variations de viscosité avec la pression d'une huile paraffinique, d'une huile naphténique et de l'eau.

Tableau 6 : Comparaison des variations de viscosité avec la pression à 20° C

Pression en MPa	Viscosité en Pascal seconde (Pa.s)		
	Huile paraffinique	Huile naphténique	eau
0,1	0,052	0,055	0,00100
140	0,81	2,20	0,00111
280	8,7	91	0,00123

Notons encore que les fluides de faible viscosité sont moins affectés par une augmentation de pression que les fluides de grande viscosité. Pour caractériser cet effet, dit « effet piezovisqueux », on peut utiliser la relation de Barus établie en 1893 [6] :

$$\mu = \mu_0 \, e^{\alpha p}$$

où p est la pression, μ_0 la viscosité dynamique à la pression atmosphérique et α le coefficient de piézoviscosité qui dépend de l'huile.

Ce coefficient est généralement compris entre :

$$5\ 10^{-9} < \alpha < 40\ 10^{-9}\ Pa^{-1}$$

Il est sensiblement constant pour des pression inférieures à 70 Mpa et peut être calculé par la relation suivantes [6, 7]

$$\begin{aligned}\alpha &= 1{,}216 + 4{,}143\ (\mathrm{Log}_{10}\ \nu)^{3{,}0627} \\ &+ 2{,}848.10^{-4}\, m^{5{,}1903}\, (\mathrm{Log}_{10}\ \nu)^{1{,}5976} \\ &- 3{,}999\ (\mathrm{Log}_{10}\ \nu)^{3{,}0975}\, \rho^{0{,}1162}\end{aligned}$$

dans cette relation α est le coefficient de piézoviscosité en 10^{-8} Pa^{-1}, ν est la viscosité cinématique à la température considérée en mm^2/s, m est le coefficient de variation viscosité température défini par la relation de Mac Coull et Walther et ρ la masse volumique du lubrifiant en g/cm^3.

7 - SPECIFICATION DES LUBRIFIANTS

Les spécifications de viscosité peuvent être établies à deux fins :

1°) Pour l'identification, ce sont alors des spécifications de raffinage ou de fabrication comportant des tolérances plus ou moins larges.

2°) Pour les applications, ce sont celles qui sont imposées par les utilisateurs en fonction de la destination ou de l'usage des huiles.

Elles sont données par des fourchettes de viscosité, des maxima et des minima, à certaines températures. Ces classifications n'évaluent pas la qualité d'une huile ; elles donnent seulement une estimation de la viscosité à une température particulière.

La classification internationale des huiles industrielles est la classification ISO VG dont chaque classe est repérée par une nombre entier qui correspond sensiblement à la viscosité cinématique en centistokes (mm^2/s) du lubrifiant à 40° C (tableau 7 norme ISO 3448 1975 et NF T 60-141). Les limites pour chaque classe correspondent à ± 10% de la valeur médiane.

La classification quasi internationale adoptée pour les huiles pour moteurs et les huiles pour transmissions (engrenages d'automobiles) est celle de la S.A.E américaine (Society of Automotive Engineers) [8]. Cette classification est en pleine évolution et la normalisation actuelle, différente de celle établie à l'origine, sera sans doute encore modifiée. Les grades S.A.E. sont définis dans le tableau 8 pour les huiles pour moteur (norme S.A.E. J 300 Dec. 1995) et dans le tableau 9 pour les huiles pour transmissions (norme S.A.E. J. 306 Oct.1991). Comme dans les cas de huiles industrielles, les grades S.A.E. correspondaient à l'origine à la valeur de la viscosité en Seconde Saybolt Universelle divisée par 10. Maintenant compte tenu des modifications apportées aux normes et de l'utilisation du système S.I., les grades S.A.E. sont des nombres dont l'ordre de croissance varie dans le même sens que la viscosité. Par ailleurs, les nombres S.A.E. suivis de la lettre W (winter) correspondent à des huiles dont le grade est déterminé à basse température et qui présente une viscosité supérieure ou égale à une valeur minimale à 100 C°.

Tableau 7 : classification ISO des huiles industrielles

Classe ISO de viscosité	Viscosité cinématique médiane mm²/s ou cSt à 40°C	Limite de viscosité cinématique mm²/s ou cSt à 40°C	
		minimale	maximale
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650
ISO VG 2200	2200	1980	2420
ISO VG 3200	3200	2880	3520

En conséquence, certaines huiles peuvent être classées avec deux grades S.A.E. dont l'un est obligatoirement affecté de la lettre « W », ce sont des huiles dites multigrades. Ainsi une huile moteur dont la viscosité est inférieure à 3500 mPa.s. à –20° C, qui possède une température limite de pompabilité inférieure à –25°C et dont la viscosité à 100° C est comprise entre 12,5 et 16,3 cSt est une huile S.A.E. 10W-40. Par ailleurs une huile peut satisfaire à plusieurs grade W ; dans ce cas seul le grade W le plus faible est retenu. Ainsi une huile qui satisfait aux grades 10W, 20W et 30 sera définie par le grade S.A.E. 10W-30. Les huiles multigrades présentent une variation de la viscosité avec la température plus faible que les huiles monogrades et leur indice de viscosité est généralement supérieur à 100.

Tableau 8 : Classification des huiles pour moteurs (S.A.E. J 300, Dec.95) d'après [9].

Grade S.A.E	Valeur maximale de la viscosité dynamique à la température donnée (a) mPa.s = cPo ° C	Valeur maximale de la température limite de pompabilité °C (b)	Viscosité cinématique à 100° C cSt = mm^2/s		Viscosité dynamique à 150° C mPa.s
			mini	maxi inférieure à	mini
0W	3250 à -30	-35	3,8		
5W	3500 à -25	-30	3,8		
10W	3500 à -20	-25	4,1		
15W	3500 à -15	-20	5,6		
20W	4500 à -10	-15	5,6		
25W	6000 à -5	-10	9,3		
20			5,6	9,3	2,6
30			9,3	12,5	2,9
40			12,5	16,3	2,9 ou 3,7*
50			16,3	21,9	3,7
60			21,9	26,1	3,7

a) Cette viscosité est mesurée selon la norme ASTM D 2602 sur un viscosimètre de type Couette (Cold Cranking Simulator) dont la vitesse varie selon la valeur de la viscosité mesurée.

b) La température limite de pompabilité est mesurée selon la norme ASTM D 3829 ; elle évalue la possibilité pour une huile d'être aspirée et mise en pression, par une pompe à huile de moteur, lors des démarrages à froid.

* 2,9 mPa.s minimum pour les huiles 0W-40, 5W-40 et 10W-40 et 3,7 mPa.s minimum pour les huiles 15W-40, 20W-40, 25W-40 et 40 monogrades

Tableau 9 : Classification des huiles pour transmissions (S.A.E. J 306, Oct.1991) d'après [9]

Grades S.A.E.	Température maximale en °C pour une viscosité de 150 Pa.s. = 150000 cPo (a)	Viscosité à 100° C cSt = mm^2/s (b)	
		mini	Maxi
70W	-55	4,1	
75W	-40	4,1	
80W	-26	7	
85W	-12	11	
90		13,5	Inférieure à 24
140		24	Inférieure à 41
250		41	

Il faut encore remarquer que les classifications S.A.E. des huiles moteurs et des huiles pour transmission sont différentes. Ainsi une huile pour transmissions S.A.E. 90 à la même viscosité à 100° C qu'une huile moteur S.A.E. 40 ou S.A.E. 50.

La figure 4 présente, dans le diagramme ASTM, la variation de viscosité de trois huiles : deux huiles monogrades et une huile multigrade.

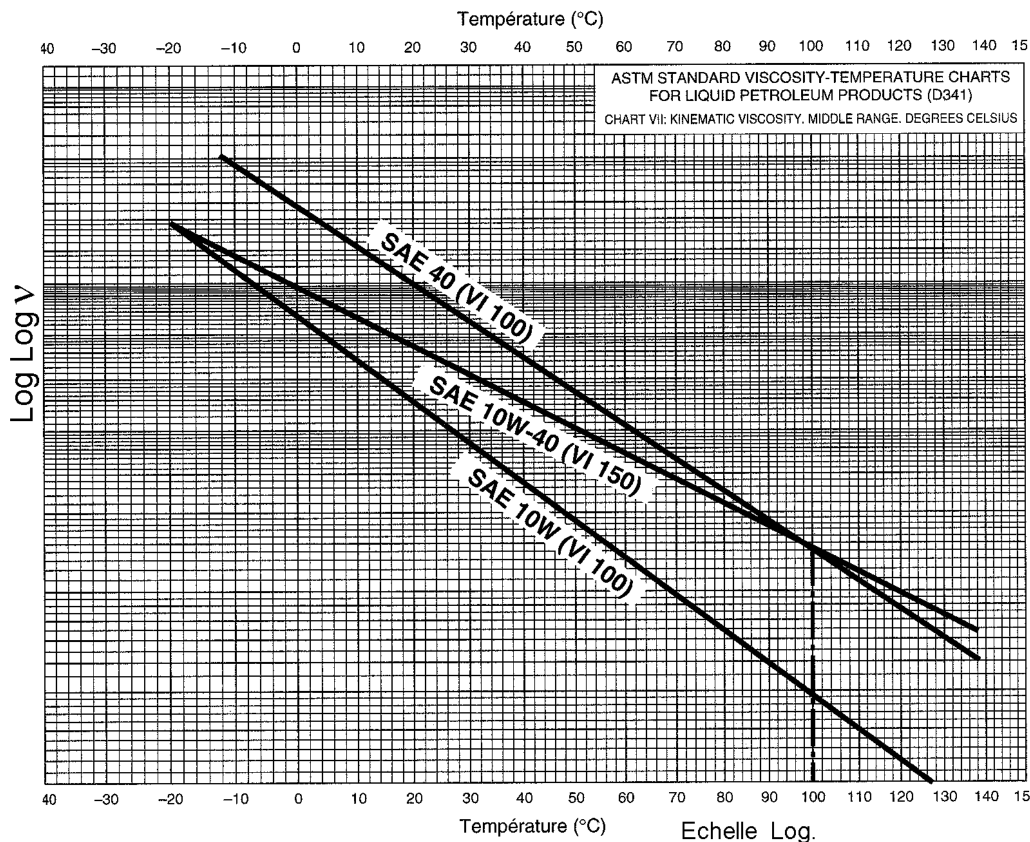


Fig. 4 : Variation viscosité température sur abaque ASTM [9]

D'autre classifications existent pour les huiles moteurs [9] ; on peut mentionner :

- Les spécifications API (American Petroleums Institute) :

Elles sont constituées d'au moins deux lettres. La première lettre est soit S pour moteur à essence, soit C pour moteur diesel. La seconde lettre par ordre alphabétique A, B, C… correspond à la date d'agrément et à la qualité de l'huile. Ainsi une huile SA était utilisée pour les moteurs à essence dans les années 1950-1960 ; alors qu'une huile SJ est préconisée actuellement pour les moteurs à essence mis en service aux U.S.A. après 1997. De même CA était utilisé dans les moteurs diesels dans les années 1950-1960 ; alors qu'une huile CG correspond aux huiles préconisées pour les moteurs diesel suralimentés construits depuis 1994.

- Les spécifications CCMC – ACEA

Ce sont les spécifications européennes mises en place depuis 1972 par le CCMC (Comité des Constructeurs d'automobiles du Marché Commun) puis par l'ACEA

(Association des Constructeurs Européens d'Automobile) qui a remplacé en 1991 le CCMC. Ces spécifications, mises en place en décembre 1995, définissent :

- trois qualités d'huiles pour moteurs à essence : l'une de basse viscosité pour économiser le carburant (A1-96), la deuxième de qualité standard (A2-96) et la troisième de haut de gamme, moins volatile et plus stable à l'oxydation (A3-96) ;

- trois qualités d'huiles pour véhicules Diesel légers : la première de basse viscosité pour économiser le carburant (B1-96), la seconde de viscosité normale et de qualité standard (B2-96) et la troisième de qualité supérieure, plus stable au cisaillement, moins volatile, plus dispersante et plus antiusure vis à vis des organes de distribution (B3-96).

8 - COMPORTEMENT NON NEWTONIEN DES LUBRIFIANTS

Le modèle newtonien présenté au paragraphe 3 pour décrire le comportement rhéologiques des fluides lubrifiants caractérise généralement de façon satisfaisante leur comportement. Cependant ce modèle n'est qu'approché et on constate que sous des sollicitations sévères de nombreux lubrifiants ne sont plus newtoniens.

Ainsi des essais réalisés sur une viscosimètre de type Couette [10] et pouvant atteindre des taux de cisaillement supérieurs à 10^6 s^{-1} montrent que la viscosité du fluide diminue lorsque le taux de cisaillement augmente (fig. 5). Cet effet, généralement réversible est caractéristique des huiles qui comportent des additifs améliorant l'indice de viscosité.

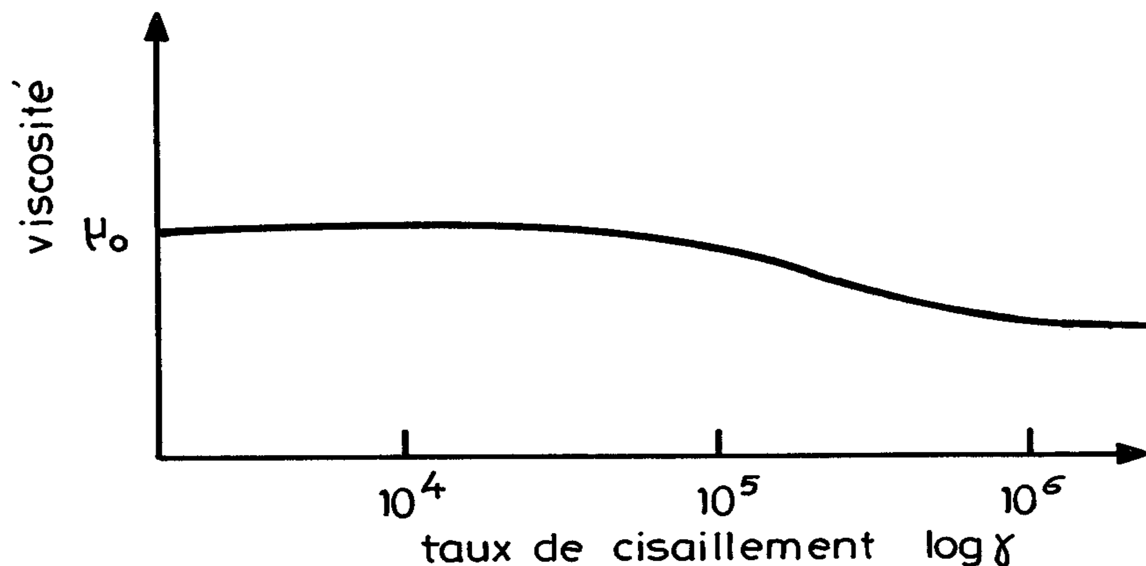


Fig. 5 : Variation de la viscosité avec le taux de cisaillement

Dans ce cas on dit que le fluide est pseudo-plastique. Cet effet peut aussi être permanent, il correspond alors à une dégradation du lubrifiant par rupture de certaines chaînes moléculaires et plus particulièrement de l'additif polymère. Ce type de comportement encore mal connu n'est généralement pas pris en compte dans la théorie de la lubrification. Les huiles lubrifiantes peuvent également avoir un comportement viscoélastique ou viscoplastique sous l'effet de la pression. Ce type de comportement sera décrit plus en détail dans l'étude des contacts élastohydrodynamique.

9 - VISCOSITE DES GAZ

La viscosité dynamique des gaz est très faible et varie peu d'un gaz à l'autre, comme le montre le tableau 10, dans des conditions normales de température et de pression.

Tableau 10 : viscosité des gaz

Gaz	Hydrogène	Néon	Azote	Air
Viscosité Pa.s.	$9\ 10^{-6}$	$31\ 10^{-6}$	$18\ 10^{-6}$	$18\ 10^{-6}$

La viscosité cinématique des gaz est élevée car leur masse volumique est très faible : $\rho = 1{,}293\ kg/m^3$. Ainsi pour l'air dans des conditions normales :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = 14\ 10^{-6}\ m^2\ s^{-1} = 14\ cSt$$

La viscosité dynamique des gaz augmente avec la température mais cette augmentation est très faible ; elle est de l'ordre de 0,1% par degré ; l'influence de la pression est également très faible. On considère généralement que la viscosité des gaz est constante.

BIBLIOGRAPHIE

[1] COURVOISIER A et DU PARQUET J. "Bases et additifs pour lubrifiants", Frottement usure et lubrification dans l'industrie C 23 – C 42 Journées, 28 et 29 septembre 1978.

[2] SCHILLING A. "Les huiles pour moteurs et le graissage des moteurs", Editions Technip 1975.

[3] RICHARD J. et ROUX F. "Lubrifiants", Techniques de l'ingénieur, B 590-591-592, 1978.

[4] GROFF J.L.E. "ABC du graissage", Edition Technip, 1961.

[5] MC COULL N. and WALTHER C. "Viscosity-Temperature chart", Lubrication, 1921.

[6] SO B.Y.C. and KLAUS E.E. "Viscosity-pressure correlation of liquids", ASLE Transactions, vol. 23, n° 4, P. 409-421, 1980.

[7] BOOSER E.R. "Handbook of lubrication. Theory and Practice of Tribology", Volume II Theory and Design, Sponsored by the ASLE and CRC Press p. 229-254, 1984.

[8] S.A.E Handbook Volume 3 : "Engines, Fuel and Lubricants", 1983.

[9] AYEL J., BORN M. et al "Lubrifiants et fluides pour l'automobile", Editions Technip, 1998.

[10] ROUSSEL G. et DU PARQUET J. "Development of a fully automatic viscosimeter for oil rheology in a broad range of shear rates", S.A.E. paper n° 821249, Fluid and Lubricants Meeting, TORONTO Canada 18-21 Octobre 1982.